DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2010.14.019

薄壁叶片加工变形误差补偿技术*

Deformation Error Compensation of Manufacturing Thin-Wall Blade

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室　蔺小军　刘维维　任军学　史耀耀
江西洪都航空工业集团公司工装所　肖德智

国外目前已普遍采用叶片无余量数控加工，制造周期短，加工一致性好，精度高。叶片无余量数控加工遇到的最大难题就是加工变形，而加工变形是影响薄壁零件数控加工效率、精度和表面质量的关键因素。

目前，国内薄壁叶片制造精加工工艺是数控半精加工与手工打磨精加工。原因在于叶片属于薄壁曲面零件，加工变形难以控制，为避免报废，必须留下足够的余量补偿数控加工引起的变形，最后依靠人工抛光，用“边打磨、边检验”的方法将叶片余量逐步去除掉。但由于手工打磨过程无冷却液，靠样板控制叶片截面形状，故加工效率低，劳动强度大，表面精度低，波纹度大，易烧伤，质量不稳定，无法满足薄壁叶片对壁厚和叶型精度控制的要求。

国外目前已普遍采用叶片无余量数控加工，制造周期短，加工一致性好，精度高。叶片无余量数控加工遇到的最大难题就是加工变形，而加工变形是影响薄壁零件数控加工效率、精度和表面质量的关键因素。

* 某型发动机国防预研项目。

薄壁叶片加工变形控制技术

薄壁叶片的变形形式主要有弯曲变形和扭转变形。薄壁叶片加工变形主要由工件、刀具、夹具和机床组成的工艺系统产生，主要原因是内应力的释放和切削残余应力产生，因此，减少加工变形的主要措施就是减少应力产生。目前，减少或消除加工应力最常用的方法有分阶段加工、热处理和高速铣削。

1 分阶段加工

为减小叶片的加工应力，加工过程分为粗加工、半精加工和精加工3个阶段。粗加工主要问题是如何获得高的生产率，切除的余量大，切削热、切削力以及内应力重新分布等因素引起的叶片变形较大；半精加工时余量较小，叶片的变形也较小；精加工时叶片的变形更小。

2 热处理

减少加工变形最有效的措施是热处理，由于粗加工余量大，加工应力相应也大，因此在粗加工和半精加工工序之间增加热处理，以去除加工应力。具体采用什么样的热处理方法要根据零件的材料和性能，按热处理规范进行选择。

3 高速铣削技术

高速铣削采用极浅的切削深度和极窄的切削宽度，因此切削力比较小，和常规相比切削力至少降低30%。这对于加工刚性较差的薄壁叶片来说可以降低加工变形，使这类零件精细加工成为可能。薄壁叶片在加工时容易产生振动，振动会导致叶片变形。因此，对于薄壁结构零件的加工，在保证加工效率的前提下，首先选择高速切削方式，以远离工艺系统的固有频率；此外，对不同壁厚的零件作模态分析，了解工件的不同阶固有频率，然后选择合适的切削速度以求避免发生工件的切削振动。

4 误差补偿技术

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

误差补偿技术自20世纪70年代提出以来广泛用于提高数控机床的加工精度[1-2]。利用误差补偿技术，即使中等精度的机床也可加工出高精度的零件[3]。根据实现方法的不同，加工误差补偿系统可以分为2类：实时误差补偿和离线误差补偿。实时误差补偿系统对切削过程进行在线监测，并根据综合误差模型的分析结果，通过反馈信息及时调整切削参数和补偿刀具路径。此种实现方案对各种实时监测设备的精度和灵敏度要求较高，相对比较难以实施。离线误差补偿的思想是运用材料力学理论分析法或有限元模拟技术分析预测工件刀触点处变形量的大小，或者通过实际测量加工样件的方法。离线误差补偿技术相对容易实施，特别适合于批量生产的情形。

加工变形误差补偿方法

通过材料力学理论分析法[4]、有限元分析法或测量数据分析法获取零件表面加工变形误差的详细分布信息，并据此预修正原始数控编程刀位，补偿刀具、零件变形产生的让刀误差，从而达到一次走刀高速精加工目的。

1 材料力学理论分析法

以工程力学和弹性力学理论为基础采用简化模型技术，建立叶片在典型夹具结构中的受力模型，并进行弹性变形分析，计算叶片工艺刚度。以图形方式直观、清晰地对比叶片在各种夹具下的工艺刚度，通过叶片长度、宽度和厚度等宏观几何尺寸方便地判断加工中变形程度和变形最大区域，在编程前选用和优化夹具结构，提出补偿措施，在一定程度上弥补让刀变形精度损失。

2 有限元分析法

根据有限元分析计算结果，建立工件加工表面的变形误差分布模型，修正原始数控编程刀位，有效补偿加工变形误差。

工件加工表层残余应力的存在严重影响其疲劳强度和使用性能，残余应力引起的扭曲变形也会显著降低工件加工精度，特别是对于航空工业中普遍使用的薄壁结构影响更大。如何准确预测、控制工件表层残余应力和扭曲变形，改善加工表面完整性以及提高数控加工精度，一直是精密、超精密切削领域重要的研究课题。运用热弹塑性大变形有限元方法，Lin等[5]模拟了不同切削速度、切削深度条件下NiP合金超精密切削表层残余应力的分布规律，发现沿工件表层深度方向残余压应力先增大到一定值后开始减小，出现最大残余压应力的位置随着切削深度的增加而加深。El－Axir[6]研究了材料的拉伸强度以及切削速度、进给率对工件车削表层残余应力分布规律的影响，认为工件表层残余应力沿深度方向符合多项式函数分布。利用测定残余应力的钻盲孔法，Sridhar等[7]分析了铣削加工钛合金IMI-834时工件表层残余应力的分布状况。研究结果表明，对于所选用的切削参数范围而言，工件表层残余应力基本上处于压应力状态，文中同时确定了在不影响材料微观组织结构和机械性能前提下的消除残余应力的最佳热处理工艺温度。

3 测量数据分析法

材料力学理论分析法和有限元分析法是对叶片变形误差进行预测，预测准确与否与切削力模型和加工工艺模型有很大关系。测量数据分析法是对加工完成的叶片试件进行三坐标测量机测量，通过检测结果的分析对叶片的加工误差进行补偿。数据分析法是事后分析，而材料力学理论分析法和有限元分析法是事前预测，相比较而言测量数据分析法成本较高。测量数据分析法是对叶片试件进行测量分析，因此试件的数量选择很重要，一般一批3～5件叶片为好。另外，试件加工也要求工艺的

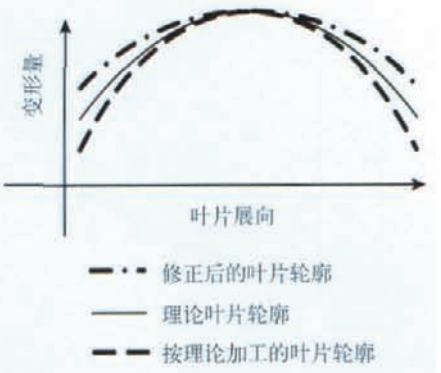


图1 叶片弯曲变形误差CAD补偿造型

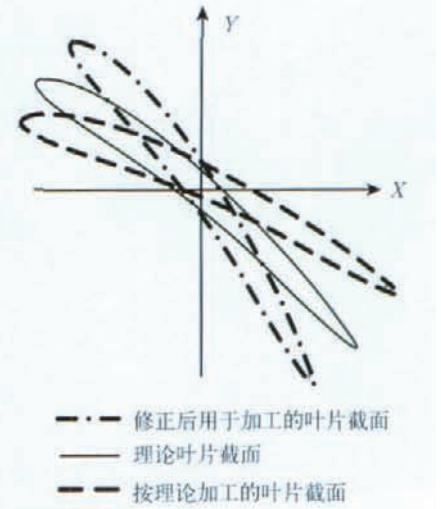


图2 叶片扭转变形误差CAD补偿造型

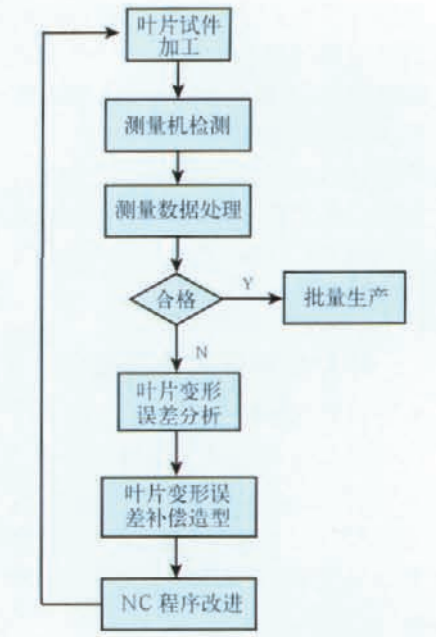
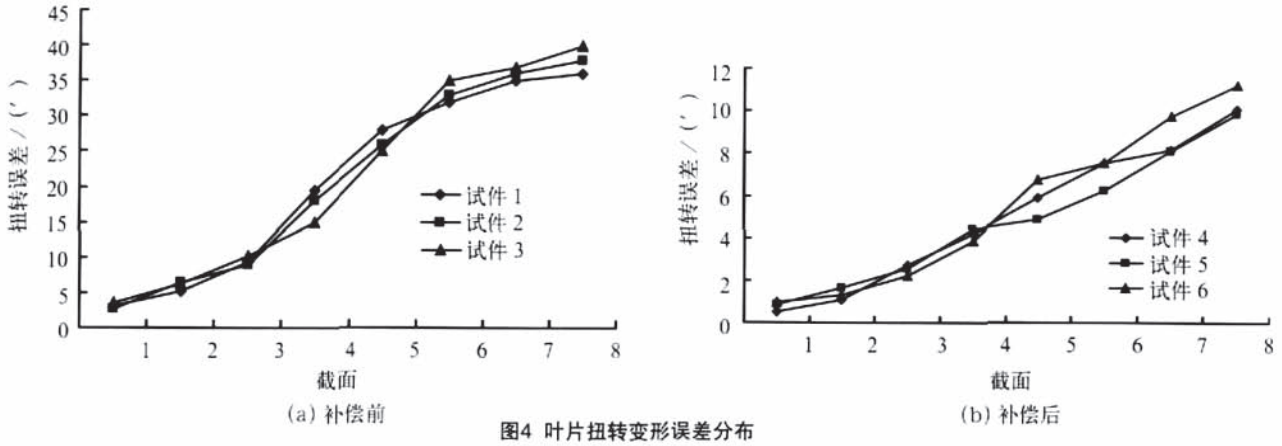


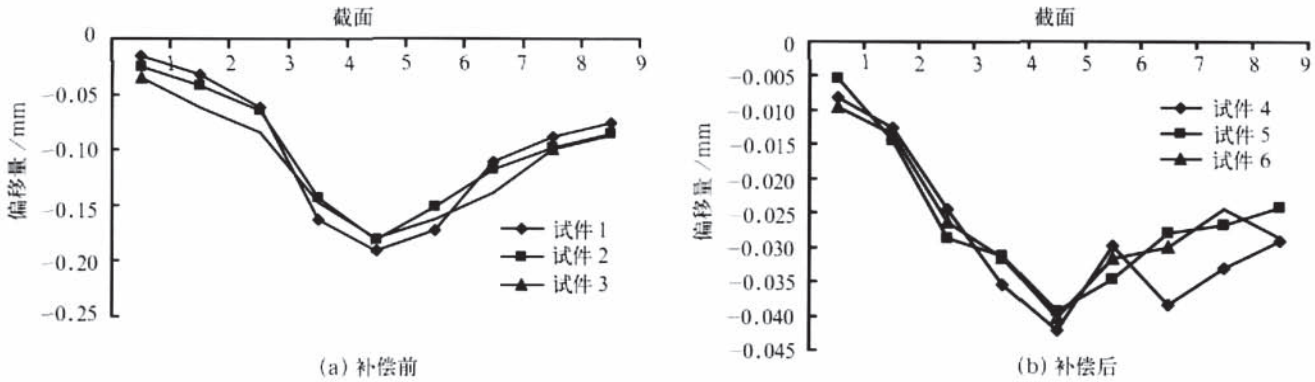
图3 叶片变形误差补偿测量数据分析法流程

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 补偿前　　(b) 补偿后

图4 叶片扭转变形误差分布



(a) 补偿前　　(b) 补偿后

图5 叶片弯曲变形误差分布

稳定性，如果工艺不稳定，加工的试件变形情况就没有规律，从测量数据中就不能准确分析叶片变形情况。

测量数据分析法是采用三坐标测量机对加工完成的叶片进行测量，通过分析测量数据得出叶片的变形误差规律，再根据叶片的变形情况对CAD模型进行修改，即对叶片CAD模型进行反变形造型，如图1和图2所示。然后通过修改的CAD模型重新编写NC代码，对叶片进行加工，总流程如图3所示。

叶片变形误差补偿实例

1 叶片扭转变形误差补偿

对某型发动机二级转子叶片3件试件进行数控加工（扭转变形误差未补偿），经测量机测量叶片8个截面并处理后计算的扭转误差如图4（a）所示。从图中可以看出，3件试件的叶片截面扭转误差（未补偿）分布趋势一致，说明加工工艺系统稳定，这3件试件具有代表性。在未进行误差补偿的情况下，最大扭转误差达39.758′，超出图纸所允许的“最大扭转误差不超过 ±12′”的要求。

根据3件叶片试件截面扭转误差的平均值对叶片加工工艺CAD模型进行叶片反变形误差补偿造型，即对叶片各截面在理论位置的基础上分别旋转 -3.126667′、-5.936667′、-9.453333′、-17.525′、-26.36817′、-33.3512′、-36.0071′、-38. 0152′，再对叶片型面重新进行造型。然后根据新CAD模型编写NC程序，并重新加工叶片3件。对重新加工的叶片进行测量机检测并处理后，扭转误差如图4（b）所示。最大扭转误差为11.5326′，满足了图纸要求。根据需要还可以进一步进行补偿，使扭转误差更小。

2 叶片弯曲变形误差补偿

对某型发动机转子叶片的3件试件数控加工（弯曲变形误差未补偿）完成后，三坐标测量机测量叶片9个截面并对测量数据进行处理后，其弯曲变形误差分布如图5（a）所示。

根据3件叶片试件各截面偏移量的平均值对叶片加工工艺CAD模型进行叶片反变形误差补偿造型，即对叶片各截面在理论位置的基础上分别平移0.02543mm、0.04526mm、0.07026mm、0.15101mm、0.18391mm、0.16234mm、0.12243mm、0.09541mm、0.0833mm，叶片型面重新进行造型。然后根据新模型编写NC程序，并重新加工三件叶片。对重新加工的叶片进行测量并处理后，叶片弯曲误差如图5（b）所示。最大偏移量为-0.04214mm，满足了图纸要求。根据需要还可以进一步进行补偿，使弯曲误差更小。

本文共有参考文献7篇，因篇幅所限未能一一列出，读者如有需要请向本刊编辑部索取。（责编　岩石）

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net